Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes (1820—1821).

OERSTED, AMPÈRE.

Die Ablenkung der Magnetnadel wurde von OERSTED 1820 entdeckt. Er sagt darüber in seinen beiden „Quartblättern", welche er brieflich an viele Akademien und Gelehrte über seine Entdeckungen versandt hat: „Die ersten Versuche über den Gegenstand, den ich aufzuklären unternehme, sind in den Vorlesungen angestellt worden, welche ich in dem verflossenen Winter über Elektrizität, Galvanismus und Magnetismus gehalten habe." Es bleibt danach unbestimmt, ob die Entdeckung schon vor oder in diesen Vorlesungen gemacht worden ist, ob es sich um eine Zufalls-Entdeckung handelt oder ob der Entdecker nach derartigen Zusammenhängen gesucht hat.

Das Grundphänomen ist sehr einfach. Ein gerader, von Süden nach Norden stromdurchflossener Draht wird über eine Magnetnadel hingeführt: Der Nordpol wird nach Westen abgelenkt.

Der Strom muß dabei recht kräftig sein. OERSTED benutzte 20 VOLTAsche Zellen, deren Zinkflächen von 12 Zoll × 12 Zoll auf beiden Seiten gleichgroße Kupferflächen gegenüberstanden, und verlangte allgemein, daß die benutzten Ströme mindestens „einen Draht zum Glühen zu bringen vermögen", ein etwas rohes Strommaß der damaligen Zeit, das aber doch einen kleinen Begriff von der Größenordnung gibt.

OERSTED variierte die Wirkungen des „elektrischen Konflikts[1]" in verschiedenen Konfigurationen. Abb. 75 a und b sind ohne weiteres verständlich. Der Nordpol bewegt sich bei a in die Zeichenebene hinein, bei b aus

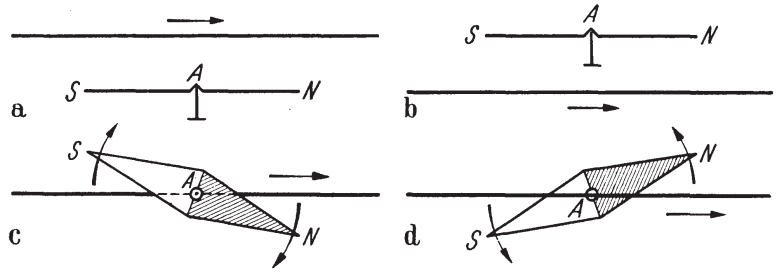

Abb. 75.

der Zeichenebene heraus. Bei c und d liegt der Leiter in der gleichen Horizontalebene *neben* der Nadel, welche zur Ermöglichung einer klaren Bewegung um die Horizontalachse A drehbar zu denken ist, entsprechend einer Inklinationsnadel; bei c liegt die Nadel für den Beschauer, der horizontal auf den Leiter sieht, vor, bei d hinter dem Leiter; bei c möchte sich N nach unten, bei d nach oben bewegen.

[1] So bezeichnet OERSTED stets den Ausgleichsvorgang zwischen den Elektroden der VOLTAschen Säule. Den Ausdruck „elektrischer Strom", durch welchen eine geläufige Vorstellung mit einem tatsächlich unbekannten Vorgang verknüpft wird, vermeidet er.

OERSTED beschreibt die Vorgänge a—d im einzelnen, hat aber auch die richtige Allgemeinvorstellung. Er sagt: „Es läßt sich auch aus dem, was beobachtet wurde, schließen, daß dieser Konflikt im *Kreise* fortgehe." Was gemeint ist, macht man sich am leichtesten aus der folgenden Abb. 76 klar. l sei der Leiter, der senkrecht in die Zeichenebene hineingeht, n seien Nordpole, die man sich als die Enden senkrecht in die Zeichenebene hineingehender Magnetnadeln denken kann. Dann besteht die Wirkung des Stromes auf die Pole, OERSTEDs „elektrischer Konflikt", in einer Bewegungstendenz, wie sie durch die Pfeile angedeutet ist, d. h. einer *Kreis*tendenz. OERSTED fühlt offenbar, daß hier etwas *ganz Neues* in die Physik hineintritt. Er meint: „Es müsse die Kreisbewegung, verbunden mit der fortschreitenden Bewegung nach der Länge des Leiters, eine Schneckenlinie oder Spirale beschreiben", fährt aber dann resigniert fort: „welches jedoch, wenn ich nicht irre, zur Erklärung der bisher beobachteten Erscheinungen nichts beiträgt."

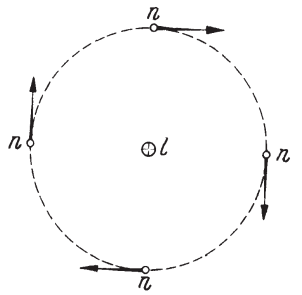

Abb. 76.

Das Neue besteht darin, daß das Kraftzentrum nicht anziehend oder abstoßend auf magnetische Pole wirkt, sondern die Pole im Kreise um sich herumtreibt. Dieses Neue läßt sich auf keine schon bekannten Erfahrungen zurückführen und muß einfach als etwas Tatsächliches hingenommen werden.

OERSTED hat sich nicht damit begnügt, die jedesmaligen Bewegungsrichtungen für die verschiedenen gegenseitigen Orientierungen des Stromes und der Magnetnadel festzustellen, sondern hat sich auch ein Bild darüber gemacht, wodurch die Größe der Nadelausschläge bedingt wird. Er fand, daß die Wirkung nicht von der elektrischen „Intensität", sondern von der elektrischen „Quantität", d. h. in unserer Sprechweise, nicht von der Spannung, sondern von der Stromstärke abhängt. Er folgert dies aus den nachstehenden Beobachtungen: „Eine ununterbrochene Reihe von elektrischen Funken", die wohl als in die Nadel einschlagend zu denken sind, „bringt keine magnetisch-elektrische, sondern nur eine elektrostatische Wirkung hervor. — Eine VOLTAsche Säule aus 100 Platten von je 2 Quadratzoll wirkt nicht merklich. — Dagegen bringt *ein* VOLTAsches Element von 6 Quadratzoll eine beträchtliche Wirkung hervor. — Ein VOLTAsches Element von 100 Quadratzoll wirkt noch in 3 Fuß Entfernung deutlich auf die Nadel. — 40 derartige Elemente hintereinander geschaltet, wirken nicht stärker, sondern eher schwächer". — Nimmt man den Ausschlag der Nadel als Maß für die Stromstärke in unserem Sinne, so erklären sich diese Beobachtungen zwanglos. OERSTED hat auch ein ganz richtiges Gefühl für die Ursache, welche bei Hintereinanderschaltung die Verminderung des Ausschlages bedingt; sie liegt in einer „Verminderung der leitenden Kraft, welche der Vermehrung der Elemente des Apparates zuzuschreiben ist". Alles in allem — 5 Jahre vor der Entdeckung des OHMschen Gesetzes — eine bemerkenswerte Klarheit der Auffassung.

OERSTED verfolgt noch eine Konsequenz seiner Entdeckung, die eigentlich nach dem Prinzip von Wirkung und Gegenwirkung selbstverständlich

ist, nämlich die Wirkung eines Magneten auf einen beweglich aufgehängten Stromkreis, wie er in Abb. 77 dargestellt ist. c c'd'd ist ein mit angesäuertem Wasser gefüllter Kasten aus möglichst dünnem Kupferblech von $^1/_2$ Zoll Breite, 3 Zoll Höhe und 4 Zoll Länge, welch letztere Dimension sich senkrecht in die Zeichenebene hinein erstreckt. ZZ' ist ein dünnes Zinkblech, welches durch zwei Korke k k' in der Mitte des Kupferkastens gehalten wird. c f f f f Z ist ein Messingdraht, der mit seinen Enden an der Kupferwand bzw. an der Zinkplatte befestigt ist und den Strom von c über f f f f nach Z leitet. b a ist ein möglichst dünner Torsionsdraht aus Messing; a c, a d sind zwei Hanffäden. Bringt man jetzt einen starken Magneten in die Nähe des beweglichen Stromkreises, so wird letzterer gedreht, was immerhin bei der absoluten Neuheit der ganzen Entdeckung OERSTED doch eine gewisse Genugtuung gewährt haben muß. Was OERSTED hierbei nicht erkannt hat, ist die Bedeutung der Fläche f f f f, durch deren Vergrößerung die Wirkung hätte stark gesteigert werden können. Andererseits erkennt OERSTED die Analogie einer Stromschleife und eines Magneten, indem er sagt: „Hier hat man also einen Apparat, dessen Enden[1] wie die Pole eines Magneten wirken". Er schwächt dann allerdings diesen Ausspruch dahin ab, „daß hier bloß die beiden Enden und nicht die Teile zwischen denselben diese Analogie darbieten." Die prinzipiell von ihm erwartete Einstellung einer solchen Stromschleife im *Erdfeld* ist OERSTED experimentell wegen der ungenügenden Beweglichkeit der Anordnung nicht gelungen, z. T. auch deswegen, weil er die Bedeutung der Schleifenfläche nicht erkannt hatte.—

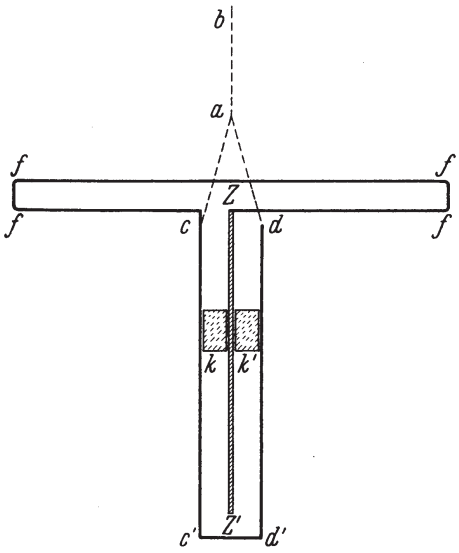

Abb. 77.

OERSTEDS fundamentale Entdeckung wurde von AMPÈRE weiterverfolgt und vollendet. Am 11. 9. 1820 brachte der aus der Schweiz zurückkehrende Physiker ARAGO die Nachricht von der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom nach Paris, am 18. 9. kündigt AMPÈRE bereits seine Hauptentdeckung, die Wirkung zweier Ströme aufeinander, dem Institut an.

AMPÈRE hat im Laufe seiner Forschungen eine ganze Anzahl von Apparaten entwickelt. Hierbei kehren drei Bestandteile immer wieder, welche wir daher vorwegnehmen wollen.

Ein Quecksilbernapf dient zur Herstellung aller elektrischen Verbindungen, und zwar nicht nur für ruhende Leitungen, sondern vornehmlich für die Herstellung solcher Verbindungen, bei welchen der eine Teil Kipp- oder Drehbewegungen ausführen muß. In den letzteren Fällen steht eine stählerne Spitze auf dem Boden des stählernen Napfes, so daß der zugehörige Apparatteil wie die Schneide einer Waage hin- und herkippen oder

[1] Gemeint sind die Endflächen der Schleife, indem man der Schleife in Richtung ihrer Normalen eine gewisse Ausdehnung zuspricht.

sich um eine senkrechte Achse drehen kann, wobei sich der Schwerpunkt von selbst in die durch die Spitze gehende Vertikale einstellt (Abb. 78). Müssen zwei Apparatteile aus mechanischen oder elektrischen Gründen an der Drehung teilnehmen, so wendet man zwei senkrecht untereinander liegende Spitzen an, wobei dann nur die obere die feste Unterlage zu berühren braucht.

Ein zweiter immer wiederkehrender Bestandteil wird durch Glasrohre gebildet, welche überall als mechanische Träger oder als feste Drehachsen dienen. Sie sind an ihren Enden mit einer kleinen Armierung aus Messing versehen, an welche die Zuleitungen und die Stahlspitzen angelötet sind. Die Hin- und Herleitung des Stromes erfolgt dabei in der Weise, daß der eine Draht im Rohr durchgeführt wird, während der andere Draht das Glasrohr in Spiralen von hoher Steigung umwindet.

Abb. 78.

Der dritte dieser Bestandteile ist ein aus Glasscheiben zusammengekitteter viereckiger Kasten, welcher über den beweglichen Teil der Apparatur gestülpt wird, um jeden Luftzug abzuhalten. Die Apparate stehen dabei auf einer hölzernen Unterlage, durch welche die Leitungen hindurchgeführt werden.

Wir gehen jetzt die Versuche an Hand der Apparate durch. Die Ergebnisse bestehen durchweg nur in qualitativen Angaben über Richtungsänderungen oder Anziehungen oder Abstoßungen, ohne daß wirkliche Messungen durchgeführt werden. So kommt in den fast 100 Seiten umfassenden Abhandlungen Ampères kein einziger Zahlenwert vor. *Eine* Apparatur (Abb. 84) ist allerdings für Messungen eingerichtet, aber nicht hierzu verwandt worden. Die Abbildungen Ampères sind z. T. nur schwer verständlich, da sie mit Detail überlastet sind, ohne die Genauigkeit von Werkstattzeichnungen zu haben. Wir haben uns daher mit möglichst vereinfachten, schematischen Zeichnungen begnügt. Übrigens ist auch die textliche Darstellung Ampères nicht sehr erfreulich, worüber sich Gilbert, der diese wichtigen Arbeiten für seine Annalen übersetzt hat, immer wieder beklagt und seine Leser beschwichtigt, jedoch stets mit dem Ausdruck größter Höflichkeit gegenüber der Person Ampères.

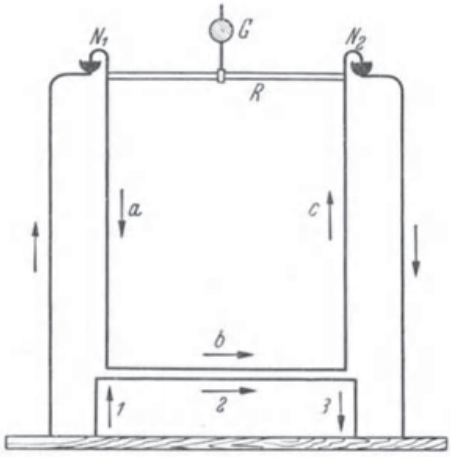

Abb. 79.

Versuch 1 (Abb. 79). a b c ist ein um zwei Stahlspitzen in den Quecksilbernäpfen N_1 N_2 schwingender Strombügel, R eine zur Versteifung dienende Glasröhre und G ein Gegengewicht, welches eine annähernd indifferente Gleichgewichtslage des Drahtbügels hervorrufen soll. 1 2 3 ist ein feststehender Drahtbügel, welcher der Übersichtlichkeit wegen etwas zu niedrig gezeichnet ist; die Strecken 2 und b liegen in Wirklichkeit in

gleicher Höhe. Der feststehende Bügel läßt sich in Nuten senkrecht zur Zeichenebene verschieben, so daß die Entfernung zwischen 2 und b beliebig geändert werden kann. Die Ströme 1 2 3 und a b c werden in Hintereinanderschaltung von ein- und derselben starken VOLTAschen Säule (12 Plattenpaare von je 1 Quadratfuß) geliefert, nachdem es anfangs zweifelhaft gewesen war, ob die beiden Ströme nicht getrennten Elektrizitätsquellen entnommen werden *müßten*.

Resultat: Die beiden parallelen Ströme ziehen sich bei gleicher Richtung an und stoßen sich bei entgegengesetzter Richtung ab.

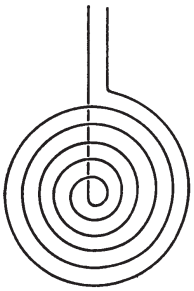

Abb. 80.

Dies ist die eigentliche Grundentdeckung AMPÈRES; alles weitere ist nur eine, wenn auch sehr fruchtbare Modifikation dieser wichtigen Erkenntnis.

Versuch 1a. Statt der geraden Stromführungen nimmt AMPÈRE zwei Spiralen (Abb. 80). Die erste ist beweglich aufgehängt, ähnlich wie der Drahtbügel (Abb. 79), die andere völlig gleichartige steht ihr in naher, einstellbarer Entfernung so gegenüber, daß die Flächen parallel sind und die Achsen zusammenfallen.

Resultat: Anziehung bei gleicher, Abstoßung bei ungleicher Stromrichtung.

Versuch 2. AMPÈRE konstruiert ein mechanisches System, durch welches eine Magnetnadel mit einer durch ihren Schwerpunkt gehenden Drehachse so eingestellt werden kann, daß die Achse mit der Richtung des magnetischen Erdfeldes zusammenfällt, daß die Bewegungen der Nadel daher nur in der zur Richtung der magnetischen Kraft senkrechten Ebene stattfinden können. Die Nadel ist damit der Wirkung des Erdfeldes entzogen, weswegen AMPÈRE sie als „astatisch" bezeichnet. Nahe am Drehpunkt und parallel der Drehebene der Nadel führt AMPÈRE einen geradlinigen Strom vorbei.

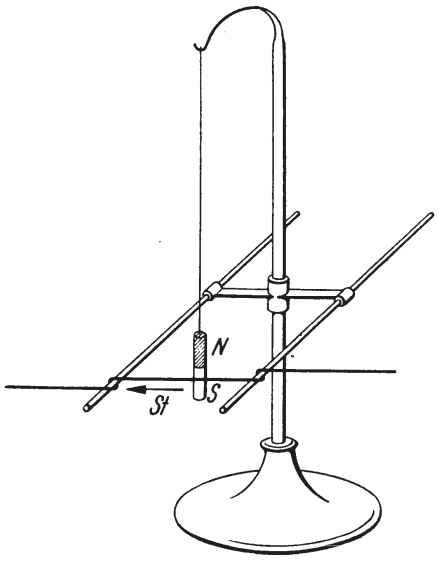

Abb. 81.

Resultat: Die Nadel, welche den Wirkungen der Schwere und des Erdmagnetismus entzogen ist, stellt sich senkrecht zum elektrischen Strom.

Dies ist eine Vereinfachung und Klärung der OERSTEDschen Entdeckung, bei welcher ja das magnetische Erdfeld komplizierend eingreift.

Versuch 3. Es soll die anziehende bzw. abstoßende Kraft eines Stromes auf einen Magneten untersucht werden. — Eine kleine Magnetnadel wird vertikal an einem Kokonfaden aufgehängt, NS der Abb. 81. An dem Magneten wird, getragen durch zwei Arme des Gestells, ein geradliniger Stromleiter St horizontal vorbeigeführt.

Resultat: Anziehung bzw. Abstoßung des Magneten je nach Richtung des Stromes.

In der heutigen Darstellungsform ergibt sich hierfür folgendes Bild (Abb. 82): St ist der senkrecht in die Zeichenebene eintretende Strom. Der Kreis ist die den Strom umschlingende Kraftlinie, welche den Nord- und den Südpol des kleinen Magneten in entgegengesetztem Sinne umtreibt, was je nach der Stromrichtung eine Abstoßung oder eine Anziehung ergibt.

Versuch 4. Es soll die richtende Kraft eines feststehenden Leiters auf einen drehbaren Leiter untersucht werden (Abb. 83). — Der Strom 1 2 3 steht fest, der Strom a b c ist mit der Achse A A drehbar[1].

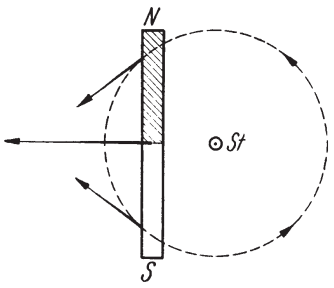

Abb. 82.

Resultat: Der feste Strom übt auf den beweglichen Strom eine richtende Kraft aus, bis die beiden Ströme parallel und gleichgerichtet sind.

Versuch 5. Herstellung eines universellen Apparates zur *quantitativen Messung* der bei verschiedenen Konfigurationen zweier Ströme auftretenden Kräfte (Abb. 84). — Die Stromschleifen A und B sind so geschaltet, daß die Wirkungen des magnetischen Erdfeldes

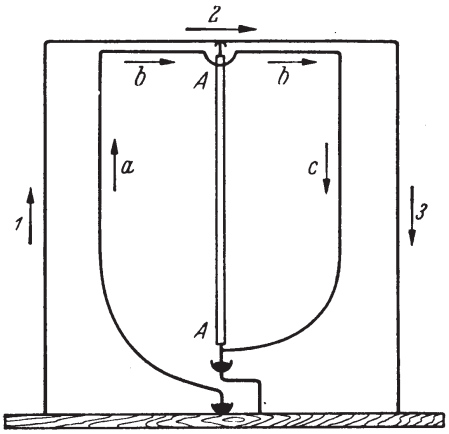

Abb. 83.

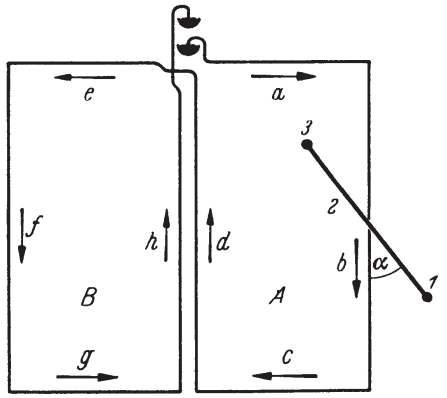

Abb. 84.

(vgl. S. 114) sich aufheben. Sie bilden mechanisch ein Ganzes und hängen mittels eines dünnen Torsionsdrahtes an einem Drehknopf mit Teilkreis. Ein feststehender Drahtbügel kann mit seiner Querverbindung „2" der geraden Strecke b auf beliebige Entfernung und unter beliebigem Winkel α angenähert werden, wobei die Bügelteile „1" und „3" senkrecht zur Zeichenebene zu denken sind (1 2 3 nach Analogie der Abb. 83). Die hierbei auftretenden Kräfte können in der bekannten Weise durch Verdrehung des Torsionskopfes gemessen werden, welche notwendig ist, um den beweglichen Bügel wieder in seine alte Lage zu bringen.

Die zu messenden Werte sollten dazu dienen, um ein aufzustellendes Differentialgesetz zu prüfen, indem man über den ersten Stromkreis gegenüber einem Differential des zweiten Stromkreises und dann über diesen zweiten Stromkreis integriert und die so errechneten Werte mit den Beobachtungen vergleicht. AMPÈRE hatte ein Differentialgesetz aufgestellt, von

[1] Die Kräfte von 1 auf a und von 3 auf c wirken ebenfalls richtend. 1 und a sowie 3 und c müßten daher zur Vermeidung wesentlicher Fehlerquellen weit voneinander entfernt werden, was aber dem Wunsche widerspricht, die ganze Anordnung eng zu vereinigen.

ähnlicher Form wie das bekannte BIOT-SAVARTsche, hat diese Gleichung in seinen experimentellen Untersuchungen aber nicht mitgeteilt, hat außerdem mit dem für quantitative Messungen durchaus geeigneten Apparat der Abb. 84 überhaupt keine Versuche durchgeführt.

Versuch 6. Herstellung einer magnetartigen Stromspule. — Da die elektrischen Ströme magnetische Wirkungen ausüben und empfangen, so erhält man bei passender Gestaltung des Stromweges magnetartige Gebilde. So wirkt eine Drahtspirale, welche auf einer Glasröhre aufgewickelt ist und deren Rückleitung durch die Achse des Glasrohres geht, wie ein Magnet auf Stahlmagnete, auf ähnliche Spulen und auf elektrische Ströme. Dabei muß man unterscheiden zwischen der Wirkung von Kreisströmen, deren Ebene streng senkrecht auf der Spulenachse steht, und der Wirkung der achsenparallelen Komponenten, welche von der Steigung der Spiralwindungen herrühren. Letztere wirken zusammen wie ein elektrischer Strom von der Länge der Achse und werden deswegen in ihrer Wirkung durch die oben erwähnte Rückleitung aufgehoben.

Resultat: Die elektrische Spule wirkt in jeder Beziehung wie ein Magnet.

Auf Grund dieser Erkenntnis führt AMPÈRE den Magnetismus ganz allgemein auf elektrische Ströme zurück. Die als Ursache des Magnetismus angenommenen Ströme könnten den Magneten umkreisen, wie die Windungen einer Spirale, könnten aber auch aus Kreisströmen der kleinsten Partikeln bestehen, so daß sich in der bekannten Weise alle Ströme im Innern des Magneten gegenseitig aufheben und nur einen wirksamen Kreisstrom in der äußersten Schicht des Magneten übriglassen.

AMPÈRE überträgt jetzt alle diese Überlegungen auf die Erde als Magneten. Er führt den Magnetismus der Erde auf Ströme zurück, welche die magnetische Achse der Erde, namentlich am Äquator, umkreisen. Der Ursprung dieser Ströme könnte etwa von „VOLTAscher" Natur sein und durch die verschiedenen Bestandteile der Erdkruste hervorgerufen werden, welche zufällig VOLTAsche Elemente bilden. Die Einzelspannungen würden sich dabei allerdings zu einem großen Teil aufheben, würden aber in ihrer Gesamtheit nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung doch einen bestimmten Überschuß nach einer Richtung haben müssen. Eine andere Entstehungsursache könnte die periodisch wechselnde Erwärmung jeder Erdhälfte durch die Sonne sein.

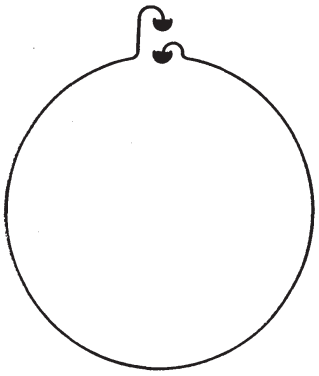

Abb. 85.

Diese Erdströme müssen auch auf die elektrischen Ströme des Laboratoriums wirken. So müßte die obige „magnetische" Spirale sich wie eine Magnetnadel in die Nord-Süd-Richtung einstellen. Ein Versuch AMPÈRES mißlang jedoch, da die Kräfte zu gering waren und da eine Erhöhung der Kräfte durch Vergrößerung der Windungszahl das Gebilde zu schwer machte. AMPÈRE veränderte daher die Versuchsbedingungen durch Anwendung einer einzigen großen Schleife, in der Erkenntnis, daß es allein auf die Größe der vom Strom umflossenen Fläche ankommt. Die Anordnung ist in Abb. 85 dargestellt. Das Versuchsresultat entsprach der Erwartung,

d. h., eine solche Schleife stellt sich mit ihrer Achse so ein wie ein Magnet, dessen Kreisströme mit dem Schleifenstrom gleiche Richtung haben.

Dieses Ergebnis entsprach der Einstellung der Deklinationsnadel im Erdfeld. AMPÈRE führt außerdem auch den der Inklination entsprechenden Versuch mit einer großen Drahtschleife durch. Die Anordnung ist in Abb. 86 dargestellt. Das stromumflossene, ausbalancierte Rechteck ist durch eine Glasachse G G und eine leichte Holzstrebe H H versteift. Stellt man diese Drahtschleife mit ihrer Längskante in die magnetische Nord-Süd-Richtung, so stellt sie sich mit ihrer Flächennormalen in die Richtung der Inklinationsnadel.

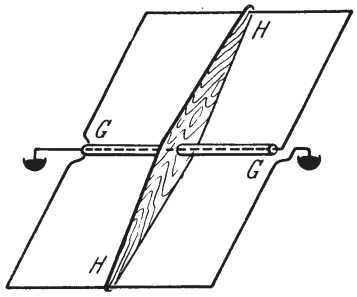

Abb. 86.

Die erdmagnetische Beeinflussung solcher Schleifen bildet eine Fehlerquelle für die früheren Versuche. AMPÈRE konstruierte daher eine Stromschleife, deren beide Teilschleifen vom Erdfeld in entgegengesetztem Sinne beeinflußt werden, was schon in Abb. 84 benutzt worden ist. In etwas anderer Anordnung ist das Prinzip dieser Schaltung noch einmal in Abb. 87 dargestellt, wobei der Abstand der Strecken a und b der Deutlichkeit wegen zu groß gezeichnet ist.

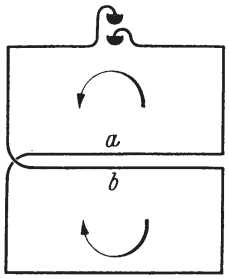

Abb. 87.

OERSTED hat eine der wichtigsten Entdeckungen der ganzen Physik gemacht, indem er die Elektrodynamik mit dem Gebiet des Magnetismus in Verbindung gebracht hat. AMPÈRE hat diese Entdeckung mit der Wirkung zweier Ströme aufeinander wesentlich erweitert und durch umfassende systematische Versuche Elektrodynamik und Magnetismus zu einer Einheit verschmolzen. Er hat außerdem den Weg geebnet zum Elektromagnetismus und zum Erdmagnetismus.